



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA MASIVNÍCH OCELOVÝCH ODLITKŮ

MANUFACTURE OF HEAVY STEEL CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN KLVÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Klváček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba masivních ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Manufacture of heavy steel castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba masivních odlitků je zvláštní oblastí ve výrobě ocelových odlitků. Jejich vlastnosti jsou značně ovlivněny dlouhou dobou tuhnutí, která má za následek vznik celé řady metalurgických vad odlitků. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje často specifický přístup jak v oblasti metalurgie, tak i slévárenské technologie.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši na téma masivních odlitků a na jejím základě popsat současné způsoby jejich výroby a základní předpoklady pro jejich výrobu.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J. aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
2. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa (klasifikace, příčiny a prevence). Brno: MATECS, 1992. 340 s.
3. LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši na téma masivních odlitků z oceli. Výroba masivních odlitků je specifickou oblastí ve výrobě ocelových odlitků. Jejich vlastnosti jsou značně ovlivněny dlouhou dobou tuhnutí, která má za následek vznik mnoha metalurgických vad odlitků. Masivní odlitky se vyrábějí v malosériové výrobě, nebo jenom v kusové výrobě. Proto není možné odstraňovat vzniklé nedostatky během vlastního výrobního procesu. Z toho důvodu jsou na výrobu masivních odlitků kladeny specifické nároky.

Klíčová slova

Masivní odlitky, tavení oceli, vady ocelových odlitků, lasturový lom, vycezeniny.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is perform a search on the topic of heavy castings of the steel. Production of heavy castings is a special part in manufacturing steel castings. Their properties are extremely influenced by a long time, which results in the creation of many metallurgical casting defects. Heavy castings are produced in small series or just a piece production. Therefore not possible remove defects during the manufacturing process. For the production of heavy castings are required specific requirements for this reason.

Key words

Heavy castings, melting of steel, defects of steel castings, conchoidal fracture, segregation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLVÁČEK, J. Výroba masivních ocelových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba masivních ocelových odlitků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22. 5. 2011

.....
Jan Klváček

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	8
1 VÝROBA MASIVNÍCH OCELOVÝCH ODLITKŮ	9
1.1 Výroba modelů	10
1.2 Výroba a příprava forem, jader	11
1.3 Výroba taveniny.....	13
1.3.1 Primární metalurgie	13
1.3.2 Sekundární metalurgie.....	16
1.4 Odlévání masivních ocelových odlitků	17
2 VADY ODLITKŮ	18
2.1 Rozdělení vad odlitků	18
2.2 Vady masivních ocelových odlitků	21
2.2.1 Připečeniny.....	21
2.2.2 Odvařeniny	22
2.2.3 Staženiny.....	23
2.2.4 Nesprávná velikost zrna	24
2.2.5 Trhliny.....	24
2.2.6 Lasturový lom	28
2.2.7 Vycezeniny	29
2.3 Předcházení vzniku vad u odlitků	32
Závěr.....	35
Seznam použitých zdrojů	36
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	39

ÚVOD

Hlavním úkolem při psaní této bakalářské práce bylo nalezení, zpracování a poskytnutí poznatků, jež se přímo týkají výroby masivních ocelových odlitků a vzniku vad při výrobě masivních ocelových odlitků.

Bakalářská práce je rozdělena do několika tematických celků. První z nich je věnován výrobě forem a jader určených k odlévání masivních ocelových odlitků, tavení a metalurgické přípravě taveniny.

Druhá část se věnuje vadám, jejichž vznik a výskyt je převážně spojován s výrobou masivních ocelových odlitků. Dále se pak zaměřuje na jejich klasifikaci a prevenci jejich vzniku.

1 VÝROBA MASIVNÍCH OCELOVÝCH ODLITKŮ

Proces výroby masivních odlitků je specifickou oblastí ve slévárenství. Odlitky se vyznačují především svou značnou velikostí a hmotností, jež dosahuje od několika desítek až po stovky tun. Zároveň se však často jedná i o odlitky s velkou tloušťkou stěny. Proto bývá někdy pojem masivní odlitek nahrazován pojmem odlitek tlustostěnný.

Vzhledem k těmto parametrům (hmotnost, velikost), se výroba masivních odlitků liší od výroby běžných odlitků menších rozměrů. I přes fakt, že se odlévá několik tun taveniny, musí být odlití rychlé. K tomu musí být přizpůsobena jak vlastní slévárenská forma s vtokovou soustavou, tak lící pánve, jeřáby, či organizace pracovníků slévárny. Po odlití zůstává odlitek několik hodin, případně dnů ve formě, aby se během této fáze tuhnutí a chladnutí zabezpečila jeho tvarová stálost. Před většinou kontrol kvalitou odlitku, se musí tyto odlitky nechat tepelně zpracovat. Všechny tyto operace jsou náročné jak na technickou a prostorovou vybavenost slévárny, tak na odbornost pracovníků.

Většina masivních odlitků je určena pro společnosti zabývající se energetickým, loďařským, těžebním, či hutním průmyslem. Speciální odlitky používané jako polotovary k tváření a válcování se nazývají ingoty (obr. 1.1).



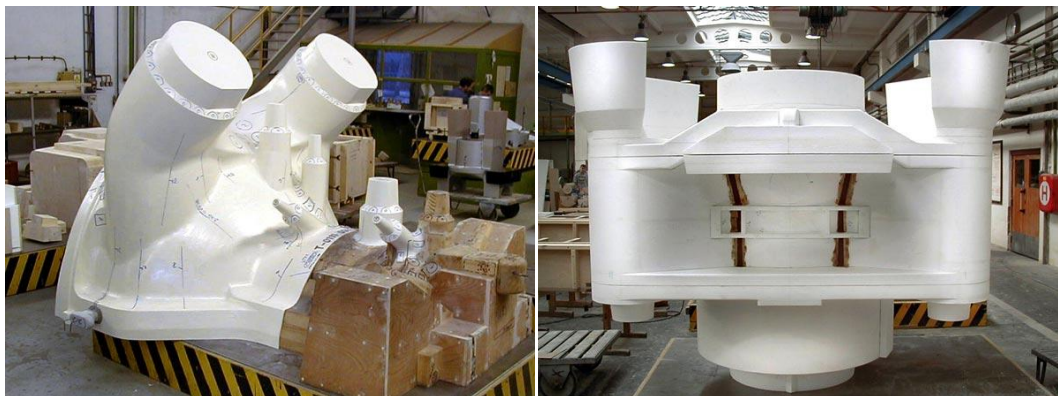
Obr. 1.1 Ingot PILSEN STEEL – 170 tun [1]

1.1 Výroba modelů

Vlastnímu procesu odlévání předchází důležité operace jako je výroba modelu, či formy. Model je vlastně součást tvarově a rozměrově odpovídající požadovanému odlitku zvětšená o technologické přídávky. Do technologických přídávků jsou řazeny např. úkosity, přídávky na obrobení, přídávky kvůli smrštění při chlazení.

K výrobě masivních odlitků z oceli se často používají modely vyráběné ze dřeva. Jedná se o stále, čili trvalé modely, které jsou používány při odlévání vyššího počtu odlitků. Masivní odlitky však nejsou zpravidla vyráběny ve velkých sériích. Proto se stále častěji využívá k výrobě modelu metoda netrvalého, vypařitelného modelu. Je to především z ekonomického a skladového hlediska. Tento systém se praktikuje při výrobě netrvalých modelů jak celých budoucích odlitků, tak jenom některých jejich částí.

V případě využití netrvalého polystyrenového modelu (obr. 1.2) se model vyrobí vyfrézováním ze základního polystyrenového bloku, nebo vytvořením několika menších polystyrenových součástí. Ty jsou k sobě následně přilepeny. Při odlévání metodou netrvalého polystyrenového modelu se polystyrenový model zaformuje do formy. Na rozdíl od dřevěného trvalého modelu by se polystyrenový model z formy nemusel vytahovat. S ohledem na značný vývin plynů při odpaření polystyrenu se model z větší části z formy vytahuje. Tím se značně sníží exhalace ve slévárně a tedy i zlepší kvalita pracovního prostředí. Zůstane-li část modelu ve formě, tak po dotyku tekoucí taveniny s modelem se model vypaří a uvolní tím dutinu, kterou zabíral. Takto vzniklou dutinu, požadovaného tvaru a rozměrů, následně vyplní roztavený kov [2].



Obr. 1.2 Polystyrenový model odlitku [2]

1.2 Výroba a příprava forem, jader

Formy se vyrábějí pomocí modelu. Model (kapitola 1.1), který má tvar a rozměry požadovaného odlitku, slouží k vytvoření dutiny budoucího odlitku. Dutiny formy jsou negativem tvaru budoucí součástí [3].

Rozdělení forem [3]:

- netrvalé formy
 - pískové směsi
- polotrvalé formy
 - keramická skořepina
- trvalé formy
 - kovová forma

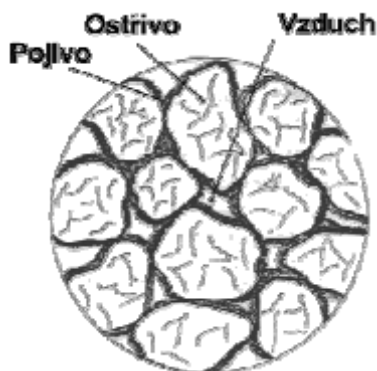
Způsoby plnění forem taveninou [3]:

- gravitační lití
 - tavenina postupuje do dutiny formy svou vlastní tíhou
- tlakové lití
 - tavenina je natlačena do dutiny formy přetlakem
- odstředivé lití
 - tavenina se do dutiny dostává odstředivou silou při rotaci formy (rotační součásti menších rozměrů)

Pro masivní odlitky se stejně jako pro většinu běžných odlitků využívají netrvalé formy a gravitační lití.

Formovací pískové směsi obsahují [3]:

- ostřívo
 - jedná se o nosnou část formovací směsi
 - je důležitá žáruvzdornost
 - na zrnitosti ostřiva závisí jakost povrchu odlitku
- pojivo
 - pojí jednotlivé složky formovací směsi k sobě
 - velikost do 0,02 mm
- přísady
 - zlepšují vlastnosti formovací směsi



Obr. 1.3 Schématický řez formovací směsí [3]

Na formovací směsi používané ke zhotovení forem a jader pro masivní odlitky jsou kladeny specifické nároky. U masivních odlitků se jedná především o mechanické, tedy pevnostní charakteristiky daných směsí. Tyto požadavky jsou dány působením velkých sil od odlitku na formu.

Pro výrobu masivních ocelových odlitků se dříve využívaly jílové formovací směsi. Ty však vyžadovaly dlouhé a nákladné vysušování. Později se pro výrobu forem, případně jader, určených k výrobě masivních odlitků, začaly používat formovací samotvrdnoucí směsi na bázi vodního skla a esteru. Protože se tato směs po použití obtížně regenerovala, nedosahovalo se jejím používáním požadované kvality povrchu odlitků a těžko se odstraňovala od odlitků, začalo se využívat fenolických formovacích směsí. Fenolické směsi s esterovým tvrdidlem v porovnání se směsmi s vodním sklem snižují podle [4] riziko vzniku trhlin. Zároveň se však jejich používáním zvyšovalo riziko vzniku staženin. Vznik staženin za použití fenolických směsí je způsoben nedostatečným ochlazováním tuhnoucího odlitku touto formovací směsí. Jedním z návrhů podle [4] bylo, aby se fenolické směsi používaly, ale v místech možného vzniku staženin se použilo chromitového písku. Chromitový písek, oproti používanému křemennému, má lepší odvod tepla. Tento postup se sice osvědčil, ale jeho použití bylo dražší, než používání alkyd uretanových směsí, nebo směsí s vodním sklem. Východiskem z této situace podle [4] nakonec bylo použití fenolických formovacích směsí (ECP) s obsahem draslíku namísto sodíku.

V současné době, se masivní odlitky, téměř bez výjimek odlévají do samotvrdnoucích formovacích směsí na bázi pryskyřic. Nejčastěji jsou používány furanové samotvrdnoucí formovací směsi. Při jejich použití je zhotovení formy rychlé a vyznačuje se též vysokou rozměrovou přesností odlitku a vysokou jakostí povrchu odlitku.

K lepšímu odvodu tepla v kritických místech se mohou použít chladítka. Jedná se většinou o kovové, či keramické předměty zaformované ve formovací směsi. Důležité je, aby dané chladítko mělo v požadované oblasti společnou plochu s dutinou ve formě. Při samotné tvorbě dochází dotykem tekutého kovu s chladítkem k intenzivnějšímu odvodu tepla z taveniny [5].

Využívání chladítek však spolu s klady (rychlejší odvod tepla) i zápory – možnost vzniku vad. Často v místech, kde se nacházejí chladítka, vznikají vady typu trhliny, odvařeniny, staženiny.

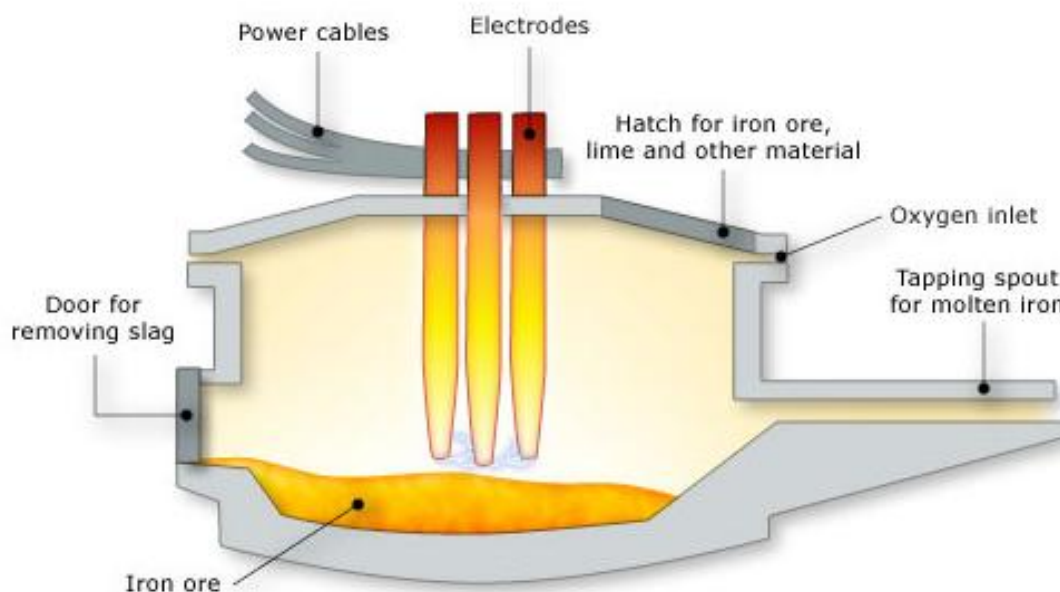
1.3 Výroba taveniny

Výrobu taveniny lze rozdělit na dva základní pochody. Primární a sekundární metalurgii. Hlavním cílem primární metalurgie je roztavení vsázky v co nejkratším čase. Sekundární metalurgie navazuje na primární a používá se pro dosažení požadovaných vlastností taveniny. Jelikož se jedná o odlišné procesy, jsou k tomu využívána rozdílná specifická metalurgická zařízení.

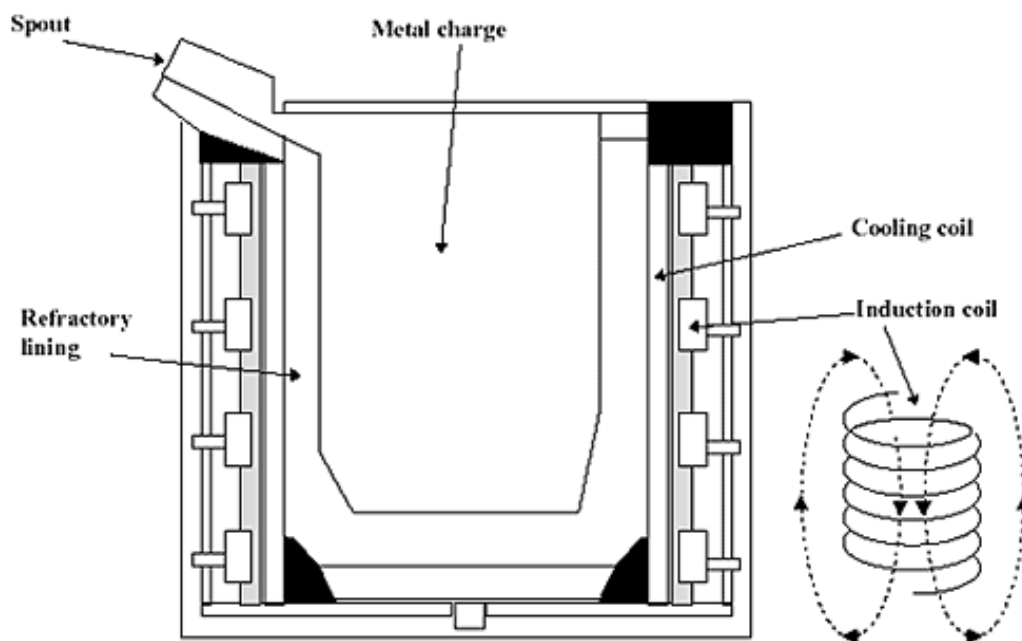
Masivní ocelové odlitky jsou odlévány většinou z uhlíkové nelegované, či nízkolegované oceli. Je to dáno parametry odlitku. Jejich hmotností a rozměry, a s tím spjatou dobou tuhnutí a chladnutí odlitku.

1.3.1 Primární metalurgie

Primární metalurgie je určena především k roztavení vsázky. K tavbě jsou využívány dva základní typy elektrických pecí, elektrická oblouková pec (EOP) – obr. 1.4, a elektrická indukční pec (EIP) – obr. 1.5.



Obr. 1.4 Řez elektrickou obloukovou pecí (EOP) podle [6]

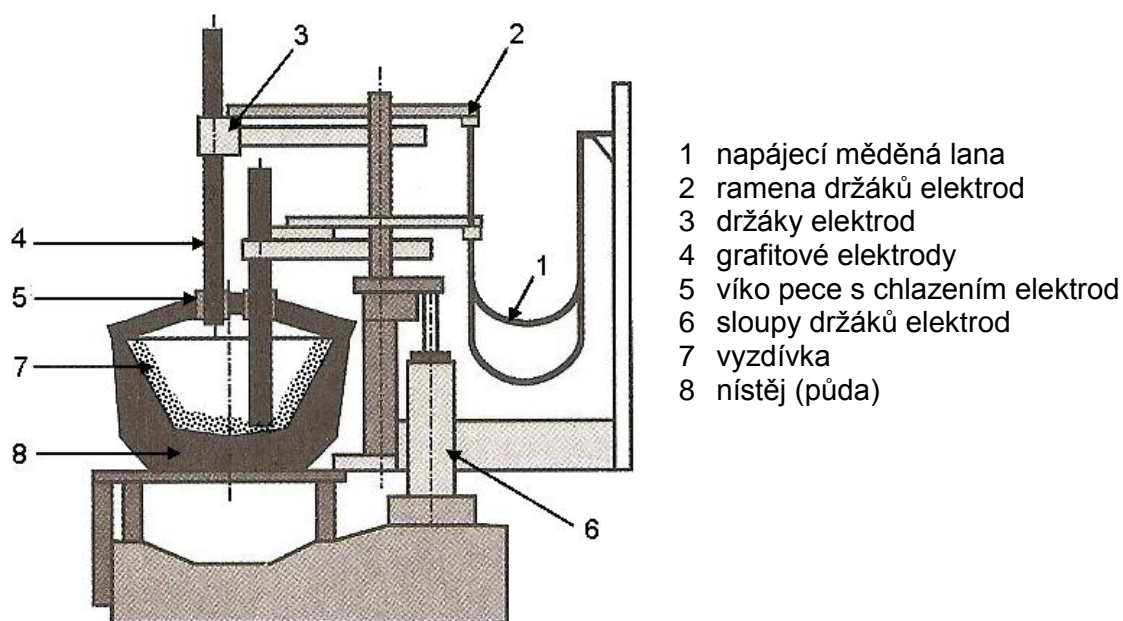


Obr. 1.5 Schéma elektrické indukční pece (EIP) podle [7]

EOP využívají při tavně elektrický oblouk vzniklý mezi elektrodami a vsázkou. U EIP proud vytváří elektromagnetické pole, procházející vsázkou. Následkem tohoto elektromagnetického pole je vznik sekundárního proudu ve vsázce, což způsobuje tavení vsázky.

Při výrobě masivních odlitků se většinou ve slévárnách využívají elektrické obloukové pece (EOP). Elektrické obloukové pece nemají tak vysoké požadavky na chemickou čistotu a kusovitost vsázky jako elektrické indukční pece (EIP). Dalším parametrem jsou velikosti pecí. Středofrekvenční EIP se vyrábějí maximálně pro 20 – 25 tun roztaveného kovu. Oproti tomu EOP jsou schopny vyrobit na jednu tavbu až 200 tun oceli. Proto nejsou EIP ve slévárnách těžkých ocelových odlitků téměř využívány [5].

EOP je napájena měděnými lany, která spojují transformátor a ramena držáků elektrod. V případě větších pecí bývají lana chlazena vodou. V držáku elektrod jsou hydraulickým, či pneumatickým zařízením drženy grafitové elektrody. Držáky elektrod jsou umístěny na sloupech. Ve víku pece jsou kolem elektrod chladiče určené k regulaci teploty elektrod. Další částí pece je nístěj (půda) a vyzdívka – obr. 1.6 [5].



Obr. 1.6 Schéma elektrické obloukové pece [5]

Dle základního členění se EOP dělí na elektrické obloukové pece s kyselou a se zásaditou vyzdívkou. V naší republice se podle [5] používají výhradně elektrické obloukové pece se zásaditou vyzdívkou. Použitím zásaditých elektrických obloukových pecí se umožňuje využití dalších metalurgických pochodů během tavení vsázky. Jedná se především o odfosfoření a odsíření, při kterém je důležitá i zásaditost strusky. Síra je nežádoucí prvek v tavenině, protože její nadměrný výskyt má za následek vznik trhlin. Odsíření musí předcházet dezoxidaci, aby se zabránilo snižování zásaditosti strusky. Při výrobě taveniny pro masivní odlitky je cílem, aby se obsah síry pohyboval pod hodnotu 0,003%. U tak nízkých obsahů nastává podle [5] ale problém se vznikem tzv. kamenitých lomů. Dalšími metalurgickými procesy, které se v zásaditých EOP provádějí, jsou dezoxidace, odfosfoření, snížení obsahu vodíku (vznik bublin) a dusíku (vznik lasturového lomu) a již výše zmíněné odsíření.

Samotná tavenba se podle [5] skládá ze tří základních částí:

- tavení vsázky
 - rychlá tavenba vsázky s nízkou spotřebou elektrické energie
 - částečné oduhličení a odfosfoření lázně
- oxidační pochody
 - oduhličení, odfosfoření
 - snížení obsahu vodíku, dusíku
 - ohřátí na odpichovou teplotu
- dohotovovací pochody
 - dezoxidace
 - odsíření
 - dolegování

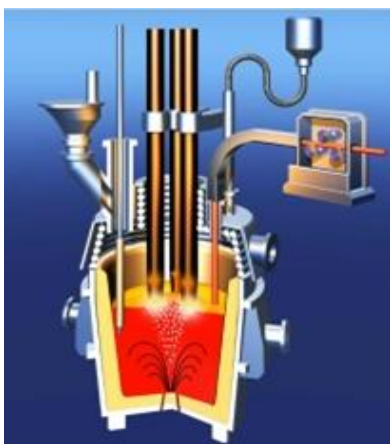
1.3.2 Sekundární metalurgie

Pro další úpravu taveniny se používá sekundární metalurgie. Tento technologický proces má důležitou funkci při výrobě taveniny. Použitím sekundární metalurgie se u taveniny snižují obsahy nežádoucích prvků. To je u masivních odlitků důležité, zejména z hlediska omezení dalšího vzniku vad v odlitcích.

Důvody pro použití sekundární metalurgie podle [8] jsou:

- zvýšení jakosti vyráběného kovu (např. snížení obsahu nežádoucích plynů, hluboké dezoxidace a odsíření, přesné dolegování apod.)
- snížení nákladů při výrobě oceli oproti výrobě pouze na EOP

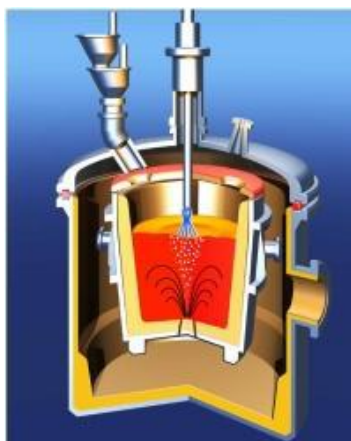
Před použitím sekundární metalurgie se v EOP roztaví vsázka (kapitola 1.3.1). Následně se využívá zejména technologií pánvových pecí, označovaný též jako LF proces (obr. 1.7). Po této metodě (LF) často následuje úprava ve vakuu (VD/VOD) – obr 1.8 a obr 1.9. Tento postup zmiňují autoři [5] i autoři [8]. Spojením těchto dvou metod lze dosáhnout vysoké chemické čistoty taveniny, kdy je obsah síry, fosforu, dusíku, vodíku, či uhlíku a kyslíku snížen na nejnižší možnou hodnotu.



Obr. 1.7 Schéma pánvové pece [9]



Obr. 1.8 Schéma procesu VD [9]



Obr. 1.9 Schéma procesu VOD [9]

1.4 Odlévání masivních ocelových odlitků

Odlévání masivních odlitků většinou nelze, vzhledem k nosnosti jeřábů, které manipulují s licími pánvemi, provést najednou. Proto se velké masivní odlitky odlévají z několika licích pánví.

Licí pánve se dělí na pánve se spodní výpustí a pánve s hubičkou. Pro odlévání oceli se používají licí pánve se spodní výpustí. Při využití těchto pánví se zamezí přenosu strusky z pánve do formy odlitku.

Při odlévání masivních odlitků se často používají pánve se spodní výpustí a tzv. šoupátkovým uzávěrem. To dovoluje využívat prvky sekundární metalurgie, kdy tento uzávěr umožňuje zpracování kovu v pánvi i po několik hodin [5].

V současnosti se využívají pro výrobu forem k odlévání masivních odlitků převážně směsi s furanovými pryskyřicemi, jak již bylo uvedeno v kapitole 1.2. Využití těchto forem má však i svá úskalí, mezi něž patří i krátká doba, po kterou si forma udrží svou pevnost. To má za následek, že licí doba musí dosahovat maximálně 2-3 minut. Což je při odlévání několika desítek tun, ba dokonce set tun, náročné na přípravu a koordinaci pohybu s plnými pánvemi. S tím je spjato i dimenzování vtokové soustavy a licích pánví tak, aby doba odlévání i masivních a velice těžkých odlitků nepřekročila 2, případně 3 minuty.

2 VADY ODLITKŮ

Nedílnou, avšak nežádoucí součástí výroby odlitků je vznik vad. I v dnešní době, plně moderních technologií a postupů, se jejich vzniku nedá zcela zabránit.

Výroba masivních odlitků je zdoluhavý proces, na jehož realizaci se podílí velké množství pracovníků. Kvalifikovanost a zkušenost těchto pracovníků se určitým dílem podepíše na vzniku vad při výrobě odlitků. Vady mohou vznikat jako nepřímý důsledek lidského jednání, jako jsou návrhy technologických postupů, metalurgické zpracování taveniny, příprava formovacích směsí, aj. Mohou ale také vzniknout přímo, chybou příslušného odpovědného pracovníka, například neopatrným sestavováním, či rozebíráním forem. Nedá se však říci, že na vznik vad má vliv jenom lidský faktor. Na jejich vzniku se podílí mnoho jiných podnětů. Mezi ně lze zařadit např. i počasí a s ním spojenou rozdílnou vlhkost vzduchu v ročních obdobích. Tento parametr se projeví i při chladnutí masivních odlitků, kdy se doba chladnutí nepohybuje v hodinách, ale ve dnech.

2.1 Rozdělení vad odlitků

Každý druh, či typ odlitku je určen k jiným pracovním účelům. Spolu s těmito funkčními účely jsou spjaty i rozdílné funkční vady. Vada, která je pro nějaký typ odlitku nepřijatelná, může být pro jiný typ odlitku zcela přípustná. Podle tohoto kritéria jsou vady rozděleny do několika základních skupin. Autoři [5] rozdělují vady do těchto základních skupin:

- a) *Zjevné vady* – tyto vady lze zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku, obvykle stačí prohlídka prostým okem pracovníka.
- b) *Skryté vady* – tyto vady lze zjistit až po obrobení odlitku, případně použitím speciálních kontrolních a měřících metod a přístrojů.

Z hlediska jakosti vady odlitku bývá toto základní rozdělení vad ještě doplněno o vady přípustné, nepřijatelné, opravitelné a odstranitelné [5].

- c) *Přípustné vady* – jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, které tyto dokumenty povolují.
- d) *Nepřípustné vady* – jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, které tyto dokumenty nepovolují (zakazují).
- e) *Opravitelné vady* – jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, jejichž oprava vhodným způsobem (tzn. zavaření, vyžihání aj.) je podle sjednaných podmínek, či platných norem dovolena.

- f) *Odstranitelné vady* - jedná se o takové technické odchylky odlitku od sjednaných podmínek mezi kupujícím a výrobcem, či od platných norem, které lze po dohodě s odběratelem odstranit. Jedná se o zvláštní způsoby oprav, které původní technologický postup nepředpokládá (např. nepředepsané tepelné zpracování aj.)

U masivních ocelových odlitků se většina závažných vad odlitků, které při výrobě vznikají, řadí do druhé kategorie, tzn. skryté vady. K jejich zjištění se z větší části využívají nedestruktivní metody zkoušení, které nenarušují odlitek. Zde lze využít metodu rentgenu, využití této metody je však limitováno tloušťkou stěny odlitku. Proto je při zkoušení masivních odlitků využívána spíše metoda s použitím ultrazvuku, která není tolik limitována tloušťkou stěny odlitku. Tato metoda je však závislá na struktuře zkoušeného odlitku. Ultrazvuk lze s určitou přesností zkoušky tedy využít především u materiálu s jemnozrnnou strukturou.

Díky současné technologii a dlouholetým poznatkům se povětšinou daří eliminovat závažnost a četnost vznikajících vad v odlitcích na minimální přípustnou hodnotu. Ke zvýšené úspěšnosti eliminace vzniku vad při výrobě odlitků slouží normy [10] jako rádce při jejich prevenci a řešení. Ty rozdělují vady odlitků do několika skupin a podskupin. Tyto normy byly vytvořeny na základě získaných zkušeností odborných pracovníků, či na výsledcích experimentů. Podle autorů knihy [11] je rozdělení vad dle české normy ČSN z roku 1964 [10] zastaralé a nevyhovující novým trendům a požadavkům na rozdělení vad odlitků. Proto se také autoři této publikace [11] rozhodli pro zdokonalený návrh systému rozdělení vad odlitků. Tento návrh obsahuje sedm základních tříd vad, kde každá třída obsahuje čtyři až osm skupin vad. Každá ze skupin vad je nadále složena z několika druhů vad.

Níže je uvedeno rozdělení slévárenských vad do tříd, skupin a podskupin, jež bylo zveřejněno v knize [5], viz Tab. 1.1 Seznam tříd, skupin a podskupin vad odlitků. Toto rozdělení vychází z normy [10] a je doplněno a zpřesněno rozdělením vad odlitků z publikace [11]. Obdobné rozdělení vad se též objevilo v [12].

Tab. 1.1 Třídění slévárenských vad odlitků na třídy, skupiny a podskupiny podle [5]

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad
100	Vady tvaru rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu
		120	Chybějící část odlitků s lomem
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar
		140	Nedodržení hmotnosti odlitku
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny
		220	Zálupy
		230	Nárosty
		240	Výronky
		250	Výpotky
		260	Zatekliny
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku
		280	Vady povrchové ochrany odlitku
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny
		320	Praskliny
		330	Porušení souvislosti mechanickým poškozením
		340	Porušení souvislosti nespojením kovu
400	Dutiny	410	Bubliny
		420	Bodliny
		430	Odvařeniny
		440	Staženiny
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost
		520	Nekovové vměstky
		530	Makrosegregace a vycezeniny
		540	Broky
		550	Kovové vměstky
		560	Nevyhovující lom
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické vměstky
		620	Vměstky
		630	Nesprávná velikost zrna
		640	Nesprávný obsah strukturních složek
		650	Zatvrdlina, zákalka
		660	Obrácená zákalka
		670	Oduhličení povrchu
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury
700	Vady chemického složení a vlastností odlitků	710	Nesprávné chemické složení
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností
		740	Nevyhovující homogenita odlitku

Každá vada je označena třímístným kódem, kdy první číslo značí třídu slévárenských vad odlitku (100–700). Následující číselný znak označuje skupinu slévárenské vady (10–80). Poslední číslo charakterizuje konkrétní vadu (1-9).

Podle tohoto návrhu existuje tedy až 108 možností charakteristických klasifikačních vad ve slitinách železa. Oproti normě ČSN [10], která nabízela pouze 37 možností vyhodnocení vad odlitku, je tento způsob mnohem přesnější. S lepším a přesnějším rozdělením slévárenských vad odlitků je samozřejmě také spjata konkrétnější vyhodnocování vad a účinnější prevence vzniku vad v odlitcích.

2.2 Vady masivních odlitků

U masivních odlitků se vyskytují některé vady, které jsou pro tyto odlitky typické a jejichž výskyt bývá pravděpodobný. Zároveň se však mohou objevit i vady vyskytující se u menších odlitků. Všechny tyto vady je možno rozdělit do několika základních skupin:

- Vady povrchu – třída slévárenských vad 200
 - Připečeniny
- Porušení souvislosti – třída slévárenských vad 300
 - trhliny
 - lasturový lom
- Dutiny – třída slévárenských vad 400
 - odvařeniny
 - staženiny
- Vady makrostruktury – třída slévárenských vad 500
 - vycezeniny (segregace)
- Vady mikrostruktury – třída slévárenských vad 600
 - nesprávná velikost zrna

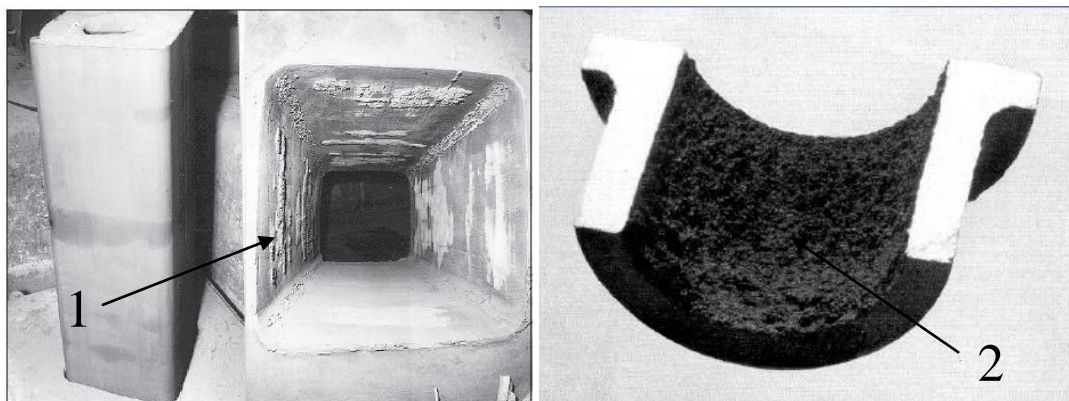
2.2.1 Připečeniny

Při výrobě masivních ocelových odlitků se častěji objevují hluboké připečeniny (obr. 2.1), než povrchové připečeniny (obr. 2.1). Proces vzniku je však pro obě tyto vady téměř totožný. V obou případech se jedná o vadu způsobenou penetrací taveniny do formy a přilnutím ostřiva k tavenině.

Hluboké připečeniny vznikají při průniku taveniny do formy do značné hloubky. Hloubka, do které se tavenina dostane, může dosahovat až několika centimetrů [12].

Autoři [5] označují jako hlavní důvody vzniku hlubokých připečenin mechanickou penetraci, vyskytující se převážně při odlévání litin, a oxidickou penetraci (chemická penetrace), ta je typická u odlévání ocelových odlitků. Existují však i další důvody vzniku hlubokých připečenin, z toho důvodu není jednoduché analyzovat vadu a najít jednoznačné řešení k jejímu předcházení.

Oxidická penetrace je způsobena oxidickými povlaky, které vznikají při odlévání taveniny do formy. Tyto povlaky obsahují prvky s nízkou afinitou ke kyslíku a vznikají nízkotavitelné sloučeniny. Vznik těchto povlaků má vliv na snížení teploty tuhnutí. Vlivem tohoto snížení teploty tuhnutí se stává forma smáčivou, což vede ke snížení kapilárního tlaku a menšímu tlaku - odporu pro penetraci taveniny do formy [5].



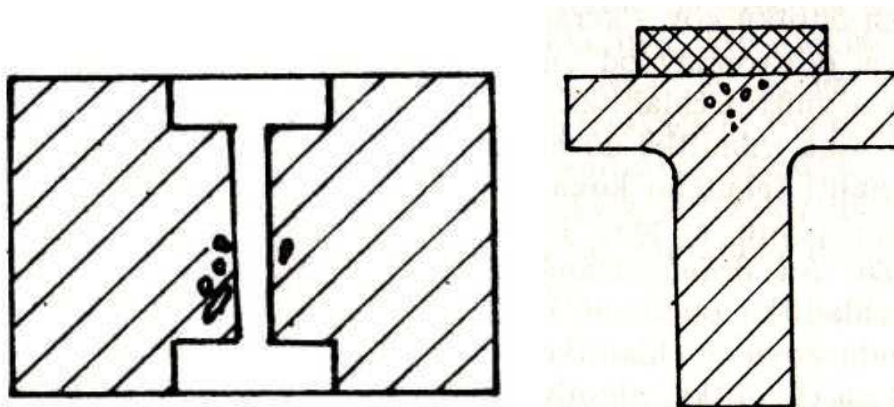
Obr. 2.1. Povrchová připečenina (1) dle [12] a hluboká připečenina (2) dle [13]

Omezení vzniku hlubokých připečenin podle [5] lze odléváním taveniny oceli po dokonalé dezoxidaci a při co nejnižší přípustné lící teplotě. Je třeba přizpůsobit technologii lití tak, aby byla co nejnižší metalostatická výška. K prevenci před vznikem připečenin se též používají speciální nátěry.

Při výrobě masivních odlitků vznikají často hluboké připečeniny (spečeniny) na kritických místech. Většinou se jedná o spodní části odlitku, kde působí velký metalostatický tlak, nebo v silně tepelně exponovaných místech jako jsou krčky nálitků [13]. Jako prevence vzniku hlubokých připečenin se tedy u masivních odlitků používají především speciální nátěry, správná teplota taveniny při lití, či chladítka. Při použití chladítek však mohou v kritických místech vznikat staženiny, nebo trhliny.

2.2.2 Odvařeniny

Odvařeniny (obr. 2.2) jsou dutiny vznikající v tuhnoucí tavenině působením plynů. Tyto plyny jsou uvolňovány působením taveniny na formu, chladítka, aj. U masivních ocelových odlitků vznikají odvařeniny především od chladítek. Je to dáno také tím, že při výrobě masivních odlitků se chladítka hojně využívají. Používají se k lepšímu odvodu tepla v oblastech tepelných uzlů, ve kterých by mohli vznikat další nežádoucí vady, např. staženiny [5].

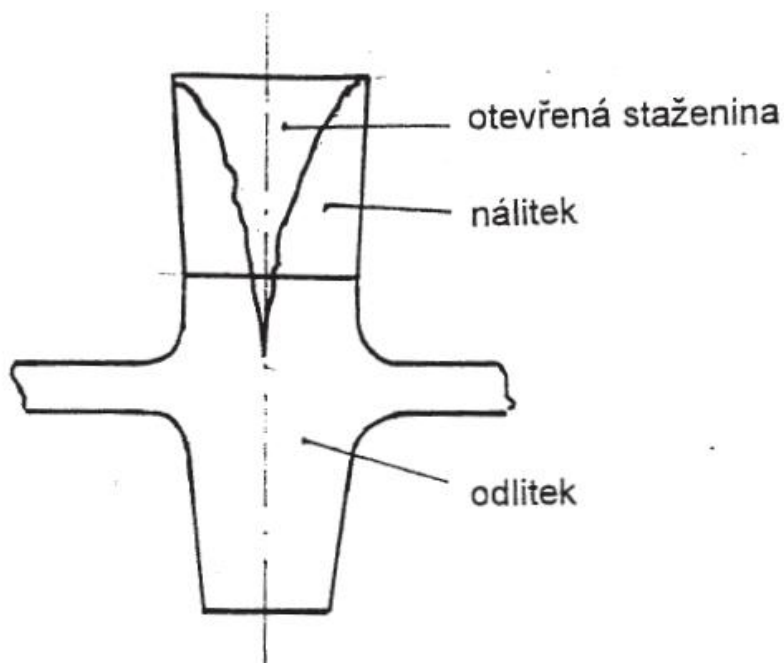


Obr. 2.2 Schématické znázornění odvařeniny dle [11]

Prvotním předpokladem pro vznik odvařenin od chladítek je nedostatečné očištění, příprava zaléváných chladítek. V případě špatné přípravy chladítek, tzn. odstranění rzi, očištění od nežádoucích nečistot, mezi litou taveninou a nečistotami z chladítek proběhnou při jejich kontaktu chemické reakce. Tyto reakce mají za následek vznik plynů. Vzniklé plyny nemají při lití prostor pro únik do atmosféry, proto vytvářejí dutiny v tuhnoucí tavenině – odvařeniny [5, 14].

2.2.3 Staženiny

Jedná se o otevřené (obr. 2.3), či uzavřené dutiny. Staženiny vznikají vlivem fyzikálních procesů, které probíhají během chladnutí, kdy dochází ke smršťování a stahování odlitku. Hlavním důvodem vzniku staženin je nedostatečné doplňování taveniny z nálitku během procesu tuhnutí. To může být podle [5] způsobeno špatným zanálitkováním tepelného uzlu, tlustší stěnou odlitku, nedostatečným objemem nálitku vzhledem k objemu odlitku, případně k objemu části odlitku, do které je náletek vyveden, nedostatečným průřezem nálitku k rozměru tepelného uzlu, nedolitím nálitku, či vysokou licí teplotou. Staženiny mohou být také způsobeny přeléváním nálitku, kdy rozlitý kov po povrchu formy může sloužit jako chladítko a náletek je ochlazen dřív, než se z něho stačí doplnit kov do potřebných míst ve formě [5]. V místech rychlého ochlazování (tuhnutí) odlitku mohou vznikat řediny. Jedná se o malé dutiny, které se často objevují na hraničních plochách odlitku a formy, případně odlitku a jader.



Obr. 2.3 Schéma otevřené staženiny zasahující do odlitku podle [12]

Staženinám se v současné době předchází především využíváním speciálních simulačních programů (viz níže). Ty, po zadání vstupních parametrů, simulují průběh teploty odlitku v závislosti na čase, tedy průběh chladnutí a

tuhnutí odlitku. Pomocí výsledků získaných z těchto simulací se následně dimenzují nálitky, vtoková soustava, či tepelné uzly.

2.2.4 Nesprávná velikost zrna

O nesprávnou velikost zrna se jedná v případě, kdy skutečné zrna neodpovídá předem stanoveným podmínkám. Většinou jde o zrna, která jsou hrubší, než stanovené podmínky. Ale v některých případech může být nevyhovující i příliš jemné zrna.

Tomuto problému se dá částečně předcházet správnou volbou a výrobou tekutého kovu. Případně regulováním chladnutí odlitku v místech vzniku vady, či žíháním odlitku, což je ale omezeno velikostí odlitku, možnostmi slévárny apod.

Doby tuhnutí se u masivních odlitků pohybují v desítkách hodin. Proto se u masivních odlitků často objevuje hrubozrnná a nerovnoměrná struktura. Ta má za následek především nežádoucí mechanické vlastnosti odlitku. Jako prevence před vznikem nesprávné velikosti zrna lze v kritických místech využít i progresivnější chlazení. Jedná se především o použití vhodných chladítek, či formovacích směsí. Využití chladítek však může v některých případech zapříčinit vznik vad, např. odvařeniny, staženiny, či trhliny. Případný způsob, jak již takto vzniklou nesprávnou velikost zrna eliminovat, je tepelné zpracování odlitku [5].

2.2.5 Trhliny

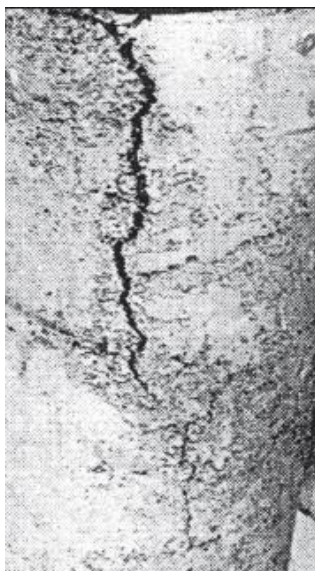
Do třídy 300, jež bývá označována jako třída vad souvislosti a struktury odlitků, se řadí i skupiny nazvané trhliny a praskliny. Trhliny vznikají při porušení materiálu v důsledku působení vnějších a vnitřních sil v odlitku, na rozhraní odlitku s formou, jádrem, při vysokých teplotách. Za praskliny, které zastupují druhou podsekcí, jsou považovány poruchy struktury a souvislosti odlitku, které vznikají porušením odlitku při nízkých teplotách. V zahraničních literaturách není používáno rozdělení vad struktury a souvislosti odlitků jako trhliny a praskliny, ale označují se jako trhliny vzniklé za vysokých teplot a trhliny vzniklé za nízkých teplot. Tyto vady mají negativní vliv na jakost odlitku, a případně i při překročení určitých parametrů, jež jsou závislé na každém druhu a typu odlévané součásti zvláště, na funkčnost daného výrobku. V některých případech se dá trhlina, či prasklina odstranit odborným opravárenským zásahem, mezi které se řadí například svařování. Tato operace je však velmi závislá např. na poloze, velikosti vzniklé poruchy a také na materiálu daného odlitku [12].

Základní rozdělení trhlín a prasklin je podle místa vzniku trhliny:

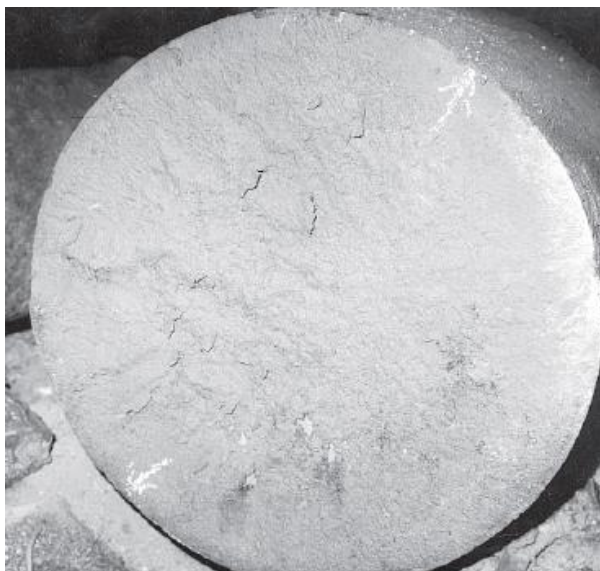
- povrchové trhliny (obr. 2.4)
- podpovrchové trhliny
- vnitřní trhliny (obr. 2.5)

Podle zkušeností, jež byly získány praxí, by se dalo konstatovat, že vznik trhlín je zapříčiněn dvěma hlavními důvody, jedním z nich jsou pevnostní a

pružně-plastické charakteristiky materiálu, a tím druhým důvodem jsou odpory proti smršťování.



Obr. 2.4 Povrchová trhlina dle [12]



Obr. 2.5 Vnitřní prasklina dle [12]

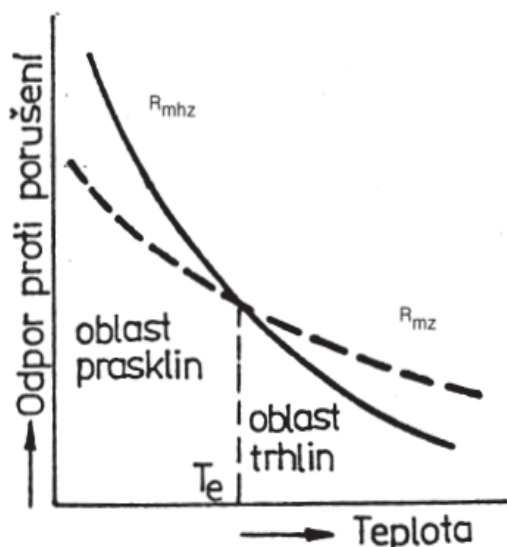
Z hlediska pevnostních a pružně-plastických charakteristik jsou při vzniku povrchových a podpovrchových trhlin důležité fyzikální, pevnostní a plastické vlastnosti odlévaného materiálu v okamžiku přechodu taveniny v tuhou fázi. Tedy při přechodu teplot pohybujících se okolo solidu. Když teploty poklesnou cca o 100°C pod teplotu solidu, poklesne možnost vzniku povrchových a podpovrchových trhlin, zvýší se však šance na vznik trhlin vnitřních. V teplotní oblasti, která se nachází okolo teploty 600°C vznikají vnitřní trhliny za studena, tzn. praskliny, což je způsobeno vývojem vnitřního tepelného napětí v odlitku.

Na vznik trhlin mají také vliv síly působící proti volnému smršťování odlitku. Tyto síly vznikají v důsledku tahových a smykových napětí vyvolaných v odlitku. V případě, kdy jsou tyto odporové síly vyvolány mechanickým odporem formy, jádra, třecími silami mezi odlitkem a formou, ztuhlé vtokové soustavy, či tlakem způsobeným sloupcem tekutého kovu, je možnost vzniku povrchových a podpovrchových trhlin v odlitku. Síly vnitřního tepelného napětí a fázové síly zapříčiňují nerovnoměrné chladnutí tekutého kovu, při odlévání, což často vede ke vzniku a vývoji vnitřních prasklin. Vzhledem k těmto faktům, jsou kritická místa vzniku trhlin, či prasklin i v oblasti chladítek [12].

Při vzniku trhlin mívá materiál odlitku charakteristické fyzikální, pevnostní a plastické vlastnosti v oblasti tuhnutí odlitku, tedy při teplotě solidu a asi 100°C pod ní. Jedná se hlavně o vlastnosti krystalujících zrn a hranic zrn. Právě na hranicích zrn se vytváří při tuhnutí mikroporuchy (např. dislokace), které posléze odlišují vzniklé zrna od zrna ideálního rovnovážného stavu. A právě zde vznikají nejčastěji trhliny. Je to dáno také tím, že hranice zrn tuhnou pomaleji než vlastní zrna z důvodu obsahu poruch, segregací či dislokací.

Ale v důsledku zpevňování za nízkých teplot mají hranice zrn větší pevnost než jakou má vlastní zrno. To vede ke vzniku transkrystalického hladkého lomu za nízkých teplot uvnitř zrna, tedy k iniciaci prasklin [12].

V případě, že je mez pevnosti hranice zrn (R_{mhz}) větší než mez pevnosti vlastního zrna (R_{mz}), mohou vznikat v dané oblasti praskliny za nízkých teplot uvnitř zrna. Jestliže je ale mez pevnosti hranice zrn (R_{mhz}) menší než mez pevnosti vlastního zrna (R_{mz}), pak jsme v oblasti vzniku trhlin za vysokých teplot [12]. Tyto závislosti jsou zobrazeny na obr. 2.6.



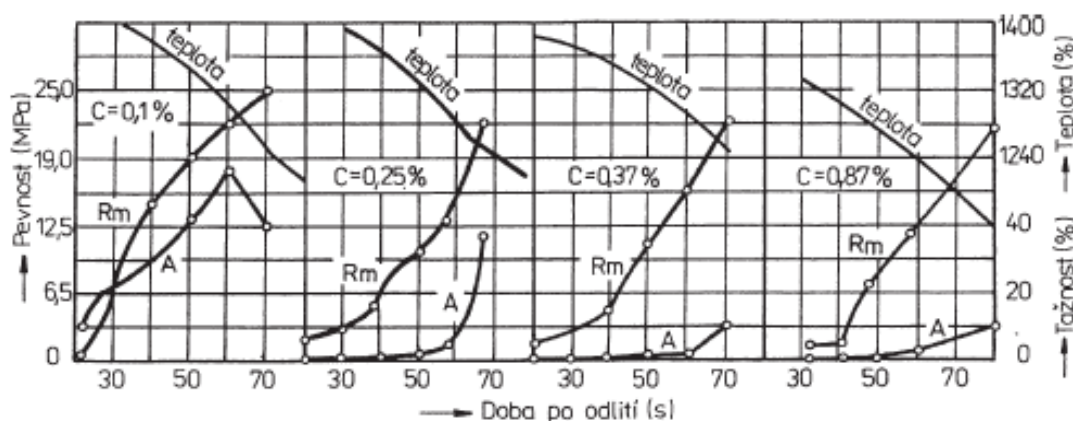
Obr. 2.6 Změna pevnosti hranic zrn a vlastního zrna v závislosti na teplotě podle [12]

R_{mhz} – mez pevnosti hranice zrn

R_{mz} – mez pevnosti vlastního zrna

T_e – teplota ekvikoheze

Chemické složení odlévaného kovu má též vliv na vytváření trhlin v tuhnoucí tavenině. U ocelí má velký vliv na vznik trhlin uhlík. Podle dlouhodobých zkušeností a experimentálních testů jsou oceli s obsahem uhlíku nižším než 0,2% více odolné vůči vytváření trhlin. To je způsobeno rozsahem dvoufázové oblasti pro daný obsah uhlíku. Kdy pro ocel s obsahem uhlíku menším než 0,2% je tento rozsah mnohem menší než pro vyšší hodnoty obsahu uhlíku. Na obr. 2.7 můžeme vidět tažnost a pevnost oceli o obsahu 0,1% C, 0,25% C, 0,37% C a 0,87% C v závislosti na době po odlití [12]. U masivních ocelových odlitků, zvláště u ingotů je požadována vysoká tažnost. Tyto požadavky jsou dány dalšími technologickými procesy, které následují po vyrobení odlitků.



Obr. 2.7 Pevnostní a plastické vlastnosti oceli v závislosti na obsahu C a na době po odlití podle [12]

R_m – mez pevnosti dané oceli v závislosti na době po odlití

A – tažnost dané oceli v závislosti na době po odlití

Trhlinu, či prasklinu se podaří odhalit často až po vyjmutí odlitku z formy. K jejich objevení se používá řada zkoušek. Velké praskliny lze odhalit pouhým lidským okem. Menší prasklinky je pak možno zjišťovat např. metodou kapilární defektoskopie. Kdy se zkoušená oblast musí očistit, osušit, napenetrovat, následně osušením odstranit přebytečnou penetraci a nanést vývojku. Vyhodnocení probíhá vizuálně lidským okem, případně pomocí speciální snímací techniky. Dalším způsobem, jak odhalit trhliny (hloubkové), je především metoda využívající ultrazvuk. Přesnost výsledků při použití ultrazvuku závisí i na velikosti zrn v odlitku, kdy hrubozrnná struktura znesnadňuje provést tuto zkoušku. Další používaná zkouška je magnetická zkouška, kdy se vlivem vady dostanou procházející siločáry na povrch a tam následně vadu zvýrazní feromagnetický prášek [15].

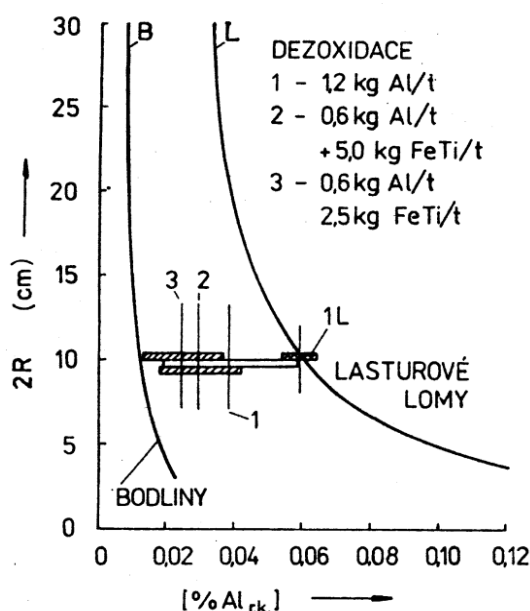
Jak již bylo napsáno výše trhliny, praskliny, lze odhalit až po odlití odlitku a jeho vyjmutí z formy. To má za následek složité opravy (svařováním), které nemusí vždy odpovídat požadavkům zákazníka. Proto je kladen velký důraz na prevenci vzniku trhin, zvláště u masivních odlitků.

2.2.6 Lasturový lom

Jedná se o vadu odlitků, která se řadí do třídy vad 300 – Porušení souvislosti odlitku. Vyskytuje se především jako nechtěný vedlejší jev dezoxidace oceli hliníkem a jedná se o následek vytvoření a rozvoje trhliny.

Pro vyvazování přebytečného kyslíku v tavenině se často používá hliníkových housek, ať při dezoxidaci ocelí v peci, nebo při dezoxidaci ocelí určených k výrobě odlitků hliníkem v lící pánvi. Na konečném obsahu hliníku v oceli závisí pravděpodobnost vzniku lasturového lomu. Proto je důležité, aby se obsah hliníku v oceli pohyboval od spodní hranice, která je dána požadavkem na zabránění uhlíkové reakce po celou dobu lití, do horní hranice limitovanou nebezpečím vzniku lasturového lomu ve vyráběném odlitku [16].

Vznik lasturového lomu je iniciován na hranicích austenitických primárních zrn, která vznikají při tuhnutí odlitku z taveniny. Jedním z hlavních činitelů, kterým je vznik lasturového lomu podmíněn, je, jak již bylo zmíněno, obsah hliníku v oceli, přesněji nitridu hliníku. Část hliníku použitého při dezoxidaci oceli se pod teplotou likvidu sloučí s dusíkem, obsaženým v oceli z její výroby. Chemickou reakcí mezi hliníkem a dusíkem vznikne nitrid hliníku. Tento nitrid je nežádoucí sloučeninou, jelikož právě on se podílí na vzniku lasturového lomu v odlitcích. Mezi faktory podílející se na vzniku lasturového lomu v odlitcích patří tedy obsah hliníku, dusíku v oceli, ale i velikost primárního austenitického zrna a tloušťka stěny odlitku (obr. 2.8) a s tím spjatá rychlost ochlazování odlitku [5, 16].



Obr. 2.8 Mezní křivky výskytu lasturového lomu v závislosti na směrodatné tloušťce stěny odlitku (2R) pro oceli s C = 0,28% a N = 0,010% [5]

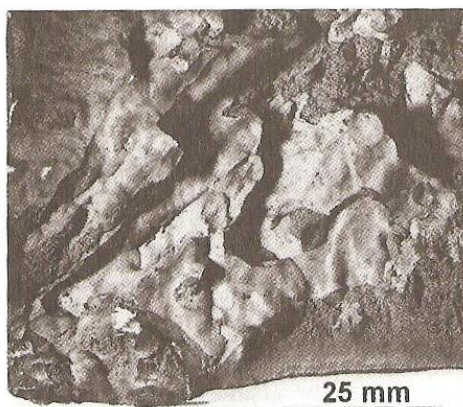
Tloušťka stěny odlitku má také negativní vliv na kritickou hodnotu obsahu hliníku. S nabývajícím tloušťkou stěny odlitku se zmenšuje kritická úroveň obsahu hliníku pro vznik lasturového lomu v součásti. S tloušťkou stěny toho však

při výrobě masivních odlitků mnoho udělat nelze, proto by se při prevenci lasturových lomů měla věnovat větší pozornost spíše obsahu hliníku, dusíku v oceli a snižování velikosti austenitického primárního zrna [16, 17].

V případech, kdy ocel obsahuje velmi nízké hodnoty dusíku, či hliníku, nedochází při jejím tuhnutí ke vzniku lasturových lomů. Při výrobě taveniny nelegovaných ocelí v obloukových pecích se obsah dusíku po dezoxidaci většinou pohybuje v rozmezí 90 – 130 ppm. A právě již při takovýchto hodnotách se objevuje riziko vzniku lasturového lomu [5].

Na změnu velikosti austenitického primárního zrna působí v tomto ohledu pozitivně přísady, jako jsou titan, niob, zirkonium, molybden, avšak i síra. Tyto prvky se také, krom toho, že zjemňují austenitické zrna, váží s dusíkem, a vytvářejí stabilnější sloučeniny, než dusík s hliníkem. Nejčastěji používaným prvkem v českých slévárnách z této čtveřice je titan. Při jeho použití se vyváže s dusíkem a hliník se váže na kyslík, ale zvýšení obsahu titanu v ocelích na odlitky má za následek zpevnění, ale i zvýšené riziko vzniku trhlin [16].

Ke zjištění náchylnosti odlitku na vznik lasturového lomu, se provádějí tzv. lomové zkoušky. K jejich provedení se společně s odlitkem odlévají i zkušební vzorky. Velikost, tvar, či případné tepelné zpracování těchto zkušebních vzorků bývá předmětem dohody se zákazníkem [5].



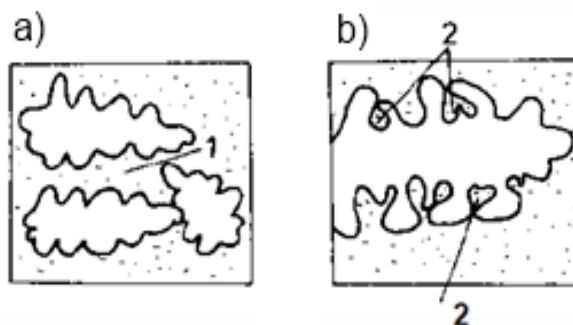
Obr. 2.9 Lasturový lom způsobený vyloučením jehlicových částic nitridu hliníku (AlN) po hranici primárních austenitických zrn [5]

2.2.7 Vycezeniny

Faktor, který se výrazně podílí na vzniku vycezenin (segregací) při primární krystalizaci, je interval tuhnutí, jenž je vymezený likvidem a solidem. V tomto intervalu přeměny taveniny v krystalickou strukturu se vytvářejí a utvářejí zrna, jejich vzájemné polohy, velikosti a chemické složení. Tato zrna nebývají chemicky stejnorodá, a právě tyto vlastnosti vedou ke vzniku mikrosegregací. Můžeme tedy konstatovat, že čím je tento interval širší, tím jsou i větší obsah nehomogenních částí v dané oblasti. Oceli se řadí do skupiny s širokým intervalem tuhnutí a působením nežádoucích prvků se toto pásmo ještě rozšiřuje. A z toho plyne, že v ocelích mohou vznikat a často vznikají místa, v nichž se vycezeniny objevují. Kvůli těmto faktům se, jak již bylo naznačeno

v kapitole 1.3, na výrobu masivních ocelových odlitků používají především nelegované, či nízkolegované oceli [10].

Pojmem vycezenina neboli segregát je dle [18] myšlena mateční tavenina, ve které se změnil obsahy prvků obsažených v oceli vzhledem k okolní původní tavenině. Jedná se tedy o obohacenou či ochuzenou taveninu oceli. Díky působení smršťovacího pnutí, jež doprovází filtraci, a kapilárních sil se segregát pohybuje ve vnitrodendritických, či v mezidendritických pórech, obr. 2.10.



Obr. 2.10 Schéma pohybu segregátu podle [12]

a) v mezidendritických pórech (1)

b) vnitrodendritických pórech (2) uzavřené ostrůvky taveniny

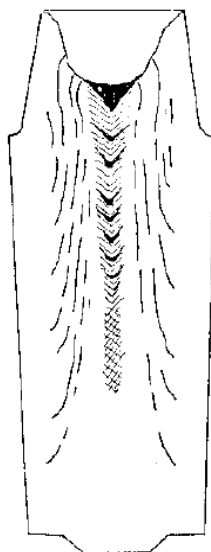
Mezi prvky, které tvoří segregáty, patří především síra a fosfor. Použitím sekundární metalurgie (kapitola 1.3.2) se jejich obsah v tavenině snižuje. To zároveň omezí i segregaci těchto prvků. Další možností, jak omezit vznik vycezenin, je použití vhodných přísadových prvků. Jedná se o prvky, které mají k nežádoucím prvkům větší afinitu než železo. Nežádoucí prvky následně vytvoří s přísadami vměstky, např. při přidání manganu se vytvoří sulfid manganu. To má za následek úbytek nežádoucích prvků v mezidendritických oblastech a tím i snížené riziko vzniku segregátu v těchto místech [5].

Vycezeniny se dělí na dvě hlavní skupiny, na mikrosegregace a na makrosegregace. Původ vytvoření mikrosegregací je, jak již bylo zmíněno, nestejnoměrném tuhnutí nestejnorodých oblastí v mateřské tavenině. Kdežto makrosegregace jsou vlastně důsledkem postupného posouvání se segregátů. Tento posun probíhá ve vnitrodendritických nebo v mezidendritických pórech. Makrosegregace se vytvářejí v celém objemu odlévané součásti. Což je dáno schopností příměsí a nečistot vytvořit vlastní oddělené části oblastí během krystalizace taveniny. Vlivem přesunu těchto vycezeninových částí během průběhu krystalizačního procesu taveniny vznikají změny objemu odlitku, v částech, do kterých přesun segregací zasáhl, to má za následek vytvoření a rozvoj staženin v dané oblasti.

Jedním z nejvíce se vyskytujícím se typem makrosegregace je pásmová segregace. Ta se dělí na přímou pásmovou segregaci a nepřímou, či obrácenou, pásmovou segregaci. Přímá pásmová segregace vzniká v masivních odlitcích pohybem segregátu proti směru odvodu tepla z odlitku a směřuje do středu odlitku. Obrácená, jak již název naznačuje, vzniká přesunem vycezenin po směru odvodu tepla z odlévané součásti k jejímu povrchu [12].

Podle [19] můžeme do skupiny makrosegregace zařadit následující typy segregací:

- segregace v důsledku přenosu tepla
 - pásmová segregace pozitivní, přímá
 - pásmová segregace negativní, obrácená
- segregace v důsledku gravitačních sil
 - mikrogravitace - růst krystalů v kosmu
 - vznik gravitačního kužele v patě ingotu
 - vyplouvání vměstků pod hlavu ingotu
 - působení odstředivých sil
- lokální makrosegregace, vycezeniny (obr. 2.11)
 - makrosegregace typu A (směrem k hlavě ingotu)
 - makrosegregace typu V (středové segregace v důsledku smršťování)
 - povrchové vycezeniny, výpotky na povrchu ingotu při obrácené segregaci
 - bodová segregace, bublinové vycezeniny do dutin po reakčních plynech (CO_2 , H_2 , N_2)
 - mezerové vycezeniny, stvolové vycezeniny, kanálkové vycezeniny



Obr. 2.11 Schéma vycezenin v ingotech podle [12]

2.3 Předcházení vzniku vad u odlitků

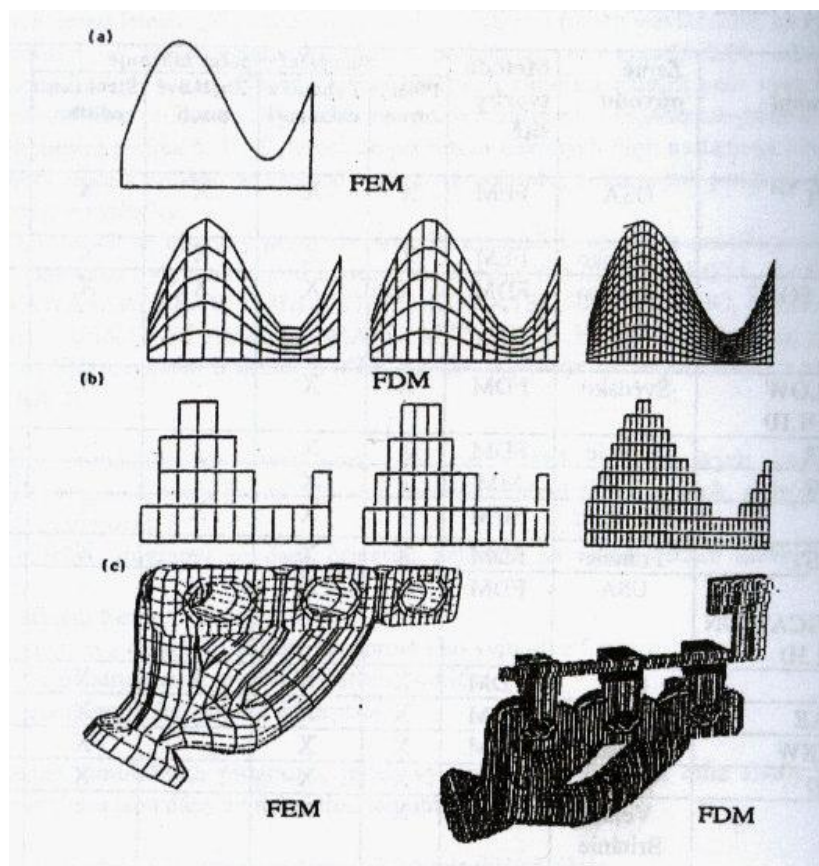
Prevence vzniku vad má při výrobě masivních odlévaných součástí nezanedbatelný význam. Dříve bylo možné zavádět preventivní opatření pouze na základě získaných poznatků. Tyto poznatky pocházely především ze zkušeností odborných pracovníků, podobnosti odlitků, odléváním zkušebních vzorků, případně celých ověřovacích sérií u menších odlitků.

Dnes se pro prevenci vzniku vad využívá převážně počítačových simulací. Díky těmto simulacím je možné nalézt problémy při výrobě odlitku ještě před započítím výrobního procesu. To je zvláště důležité při výrobě masivních odlitků.

Uvádí se, že simulační programy využívají zejména dva základní systémy, pomocí kterých probíhá vlastní simulace. Metodu konečných prvků (FEM - Finite Element Method) a metodu konečných diferencí (FDM – Finite Difference Method).

Systém využívající metody konečných prvků (FEM) rozloží dané oblasti na konečný počet prvků. Předpokladem je, že jsou navzájem propojeny uzlovými body na hranicích prvků (obr. 2.12) [19, 20].

Metoda konečných diferencí (FDM) je oproti FEM založena na nahrazení základní diferenciální rovnice i s okrajovými podmínkami diferenční rovnicí (obr. 2.12). Tato metoda bývá též někdy označována jako metoda sítí [19, 20].



Obr. 2.12 Schéma dělení ploch při využití numerických metod [19]

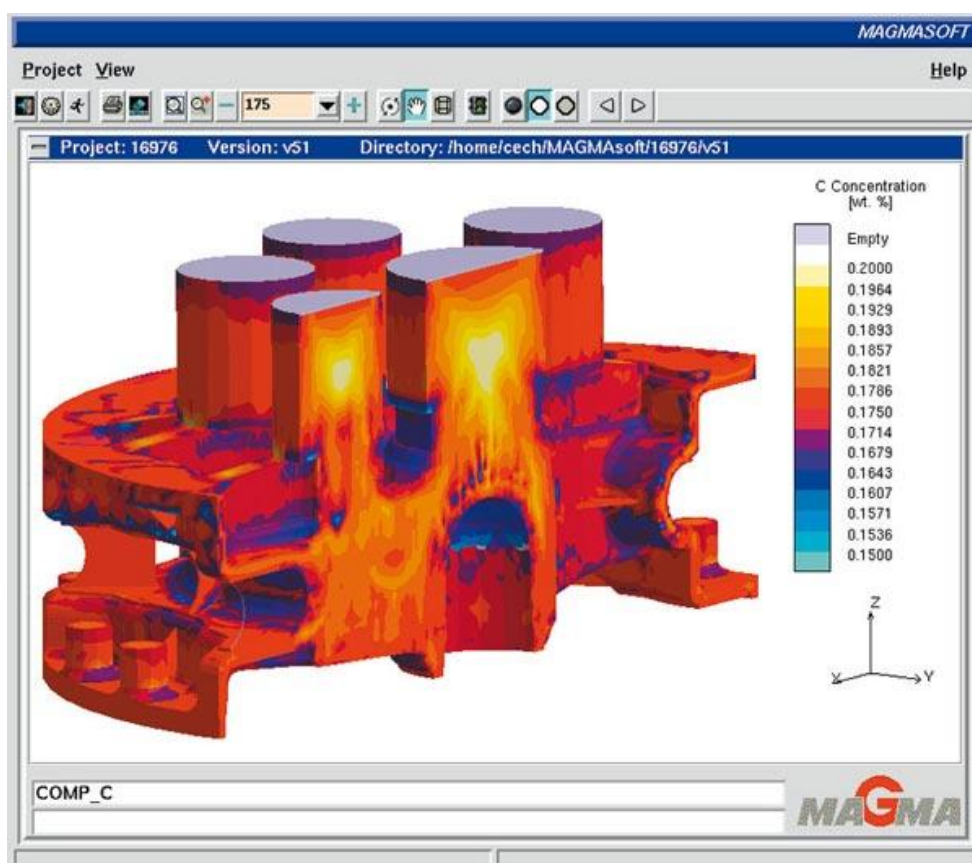
Podle [19] se FEM oproti FDM vyznačuje určitými výhodami:

- lepší geometrický popis při složitých tvarech integrační oblasti
- využívá zjemněné diskretizace v kritických místech
- pro zvýšenou přesnost výsledků umožňuje využití vyšších aproximačních funkcí

FDM je však citlivější na přesnost rozložení teplot ve větších hloubkách pod povrchem odlitku [20]. Proto by se dalo říci, že je vhodnější pro simulace tuhnutí a chladnutí masivních odlitků.

Počítačová technika ve spojení se speciálními programy pro simulaci výroby odlitků se začala využívat v 80. letech 20. století. Do skupiny hlavních vývojářů a distributorů těchto programů patří Japonsko, USA, Francie, Německo a Velká Británie. Zpočátku byly simulační programy zaměřeny pouze na simulaci tuhnutí odlitku. Nyní jsou možnosti využití těchto programů poněkud širšího charakteru. Podle [20] se jedná hlavně o problémy spjaté:

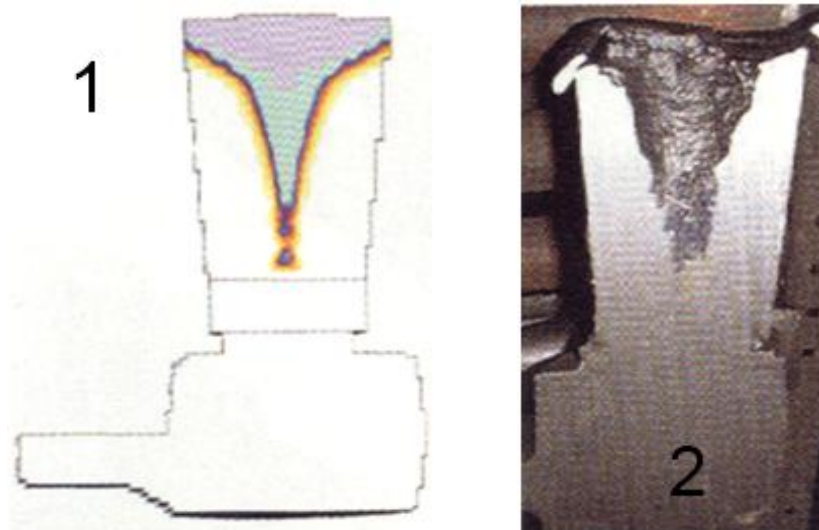
- s tuhnutím a chladnutím odlitku (obr. 2.13) – vznik vycezenin, aj.
- se vznikem struktury a utvářením vlastností odlitku
- se vznikem vnitřních pnutí a deformací – vznik trhlin



Obr. 2.13 Simulace tuhnutí odlitku [2]

Simulační schopnosti programů a shodnost jejich výsledků s reálnými poznatky (obr. 2.14) jsou závislé zejména na těchto parametrech [19, 20]:

- matematický popis probíhajících dějů při odlévání, např. vedení tepla
- zahrnutí rozdílů odlévané taveniny od ideálních předpokladů, např. teplotní závislost uvolňování latentního tepla
- určení tepelně-fyzikálních odlévaného materiálu
- definice proudění kapalin, např. rovnice hybnosti



Obr 2.14 Simulovaná staženina (1) a reálná staženina (2) podle [21]

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla jako hlavní cíl provést rešerši na téma pojednávající o výrobě masivních odlitků z oceli.

Při realizaci tohoto zadání byl kladen důraz především na popsání a přiblížení vad u masivních ocelových odlitků. Zároveň zde byla představena technologie výroby těchto odlitků.

Souhrnem by se dalo říci, že k výrobě masivních ocelových odlitků neodmyslitelně patří specifické požadavky, ať už se jedná o formovací směsi a jejich přípravu, výroba modelů, příprava taveniny, či vlastní odlévání odlitků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *PILSEN STEEL s.r.o. – Výrobky* [online].
Dostupné z URL: <<http://www.pilsensteel.cz/img/Ingoty3.jpg>>
[cit. 17. 2. 2011].
- [2] *ŽĎAS, a. s. – Metalurgie* [online].
Dostupné z URL: <<http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?catid=6>>
[cit. 3. 5. 2011].
- [3] *Slévání* [online prezentace]:
Dostupné z URL:
< <http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/novakova/cv-1.pdf>> [cit. 5. 5. 2011].
- [4] GORBY, W. A., MARKOW, L. W., WINTERS, D. L. Fallstudie über das Vermieden von Einfallstelen bei in Phenolharz-Ester-Sand gefertigten großen Stahlgußstücken. *Gießerei – Praxis*, Nr.11/12, 1996, s. 232-238.
- [5] ŠENBERGER, J., BŮŽEK, Z., ZÁDĚRA, A., STRÁNSKÝ, K., KAFKA, V. *Metalurgie oceli na odlitky*. VUTIUM, Brno 2008.
- [6] *Iron and steel – Te Ara Encyclopedia of New Zealand* [online].
Dostupné z URL: < <http://www.teara.govt.nz/en/iron-and-steel/2/4>>
[cit. 18. 5. 2010].
- [7] *Industrial Metal Casting - Electric Induction Furnaces* [online].
Dostupné z URL: <<http://www.industrialmetalcasting.com/electric-induction-furnaces.html>> [cit. 3. 5. 2010].
- [8] *Výroba železa a oceli* [online].
Dostupné z URL: <<http://www.benjamin.ic.cz/Vyroba.pdf>>
[cit. 18. 5. 2010].
- [9] DOLEŽAL, P. *Výroba a vady masivních odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
- [10] ČSN: VADY ODLITKŮ NÁZVOSLOVÍ A TŘÍDĚNÍ VAD.
ČSN 42 12 40. Schválena 1. 4. 1964. Vydavatelství ÚNM, Praha 1964.
- [11] ELBEL, T., HAVLÍČEK, F., JELÍNEK, P., LEVÍČEK, P., ROUS, J., STRÁNSKÝ, K. *Vady odlitků ze slitin železa (klasifikace, příčiny a prevention)*. MATECS, Brno 1992.
- [12] Vady odlitků. *Slévárenství* [databáze na CD-ROM]. Seriál článků z časopisu Slévárenství: Vady odlitků vycházející mezi roky 1997-2002.
- [13] TOMEK, L., KOSOUR, V. *Predikce vzniku vad typu připečenin a hlubokých zapečenin* [online prezentace].
URL: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/Predikce-pripeceniny-zapeceniny.pdf>> [cit. 4. 4. 2011].

- [14] PERNICA, V. *Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.
- [15] *TECHNOTEST – Nedestruktivní zkoušky materiálu* [online]. URL:<<http://www.technotest.cz/www/0010.M.index.htm>> [cit. 4. 5. 2011].
- [16] *Výroba nelegovaných ocelí na odlitky v zásaditých obloukových pecích* [online]. URL:<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_5.doc> [cit. 13. 2. 2010].
- [17] BŮŽEK, Z., KOSŇOVSKÝ, Z. Lasturový lom těžkých odlitků. *Sborník přednášek – Mezinárodní vědecká konference VŠB - Technická univerzita Ostrava*. Ročník 1995, str. 109-113.
- [18] KUCHAR, L., DRÁPALA, J. *Příspěvek k teorii segregáčních jevů při krystalizaci kovů a slitin* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2002/sbornik/papers/99.pdf>> [cit. 21. 3. 2010].
- [19] *Počítačové simulační programy pro odlévání materiálu – jako moderní nástroj pro získání kvalitních odlitků* [online prezentace]. URL: <http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/pocitacove_simulacni_programy.pdf> [cit. 7. 4. 2011].
- [20] *Slévárenské simulační programy* [online]. URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy>> [cit. 27. 10. 2010].
- [21] KOVÁČ, M. *Simulace slévárenských procesů* [prezentace]. Výuková prezentace VUT BRNO ÚST odbor SLÉVÁRENSTVÍ. [cit. 19. 5. 2010].
- [22] *Degradační procesy v konstrukčních materiálech výrobků* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.tdsbrnosms.cz/dokumenty/technicke-informace/degradacni-procesy-v-konstrukcnich-materialech.doc>> [cit. 21. 3. 2010].
- [23] *Defektoskopie* [online prezentace]. Dostupné z URL: <<http://www.ateam.zcu.cz/download/NDT%20pro%20MDMT.pdf>> [cit. 12. 5. 2010].
- [24] BEDNÁŘOVÁ, V. *Metody výroby slévárenských forem a jader zmrazováním* [online]. Dostupné z URL: <http://www.fmfi.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fmfi/1263-Bednarova_zpusoby-zmrazovani.pdf> [cit. 12. 5. 2010].
- [25] CARBOL, Z., aj. Zvyšování jakosti těžkých ocelových odlitků ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery, a. s. *Slévárství*, 2009, roč. 57, č. 9-10, s. 332-336.

- [26] SOCHOR, J., NOVÁK, J. Optimalizace tepelného zpracování u silnostěnných odlitků z austenitické manganové oceli. In *Perspektivy slévárenství. Sborník konference Plzeň 3.-4. června 1997 pořádané Vědeckotechnickou společností západních Čech*. Ročník 1997, s. 121-129.
- [27] KUBOŇ, M., SENZ, L. Nálitkování masivních ocelových odlitků dle zkušeností Vítkovice, a.s. In *Perspektivy slévárenství. Sborník konference Plzeň 3.-4. června 1997 pořádané Vědeckotechnickou společností západních Čech*. Ročník 1997, s. 167-182.
- [28] PLUHÁČEK, J., KUBOŇ, M. Možnosti potlačení působení nitridů A1N v masivních ocelových odlitcích pomocí tepelného zpracování. In *Perspektivy slévárenství. Sborník konference Plzeň 3.-4. června 1997 pořádané Vědeckotechnickou společností západních Čech*. Ročník 1997, s. 183-195.
- [29] HAVLÍČEK, F., KOZELSKÝ, P., SZROMEK, P. *Podmínky vzniku poruch souvislosti materiálů u odlitků a ingotů* [online]. URL: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2001/sbornik/papers/48.pdf>> [cit. 4. 3. 2010].
- [30] BÖHMER, W. F. A., SAHM, P. R. Numerische Simulation und experimentelle Validierung makroskopischer Seigerungen im Stahlguß. *Giessereiforschung*, n. 1, 1997, 49, s. 1-10.
- [31] *Obloukové pece* [online prezentace]. URL: <https://www.powerwiki.cz/attach/ET2/OBLOUKOVE_PECE--final.ppt> [cit. 18. 5. 2010].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost oceli
ppm		Jedna miliontina objemu
R	[cm]	Směrodatná tloušťka stěny
R _m	[MPa]	Mez pevnosti oceli
R _{mhz}	[MPa]	Mez pevnosti hranice zrn oceli
R _{mz}	[MPa]	Mez pevnosti vlastního zrna oceli
T _e	[°C]	Teplota ekvikoheze
ECP		Fenolická formovací směs
EIP		Elektrická indukční pec
EOP		Elektrická oblouková pec
FDM		Metoda konečných diferencí
FEM		Metoda konečných prvků
LF		Pánvová pec
VD		Proces sekundární metalurgie za sníženého tlaku (vakua)
VOD		Proces sekundární metalurgie za sníženého tlaku (vakua) s tryskou na dmýchání kyslíku